بررسی خواص فشاری و ریزساختاری نانو کامپوزیت‌های $Al\text{-}SiO_2$ تولید شده با امواج مافوق صوت و ریخته گری گردابی*

اکرم صالحی[۱] ابوالفضل باباخانی[۲] سید مجتبی زبرجد[۳]

چکیده

در این تحقیق، نانو کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت شده با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰٪ وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم، با استفاده از دستگاه امواج مافوق صوت، تولید شدند. ریزساختار زمینه با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و SEM به همراه EDS بررسی شد و از نانوکامپوزیت‌های تولید شده، آزمون فشار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیس، با ایجاد مراکز جوانه‌زنی برای ترکیبات بین فلزی باعث اصلاح ساختار آن‌ها و بهبود خواص محصول نهایی خواهد شد و افزودن نانوذرات سیلیس تا ۰/۵٪ وزنی، افزایش استحکام محصول نهایی را در پی دارد.

واژه های کلیدی نانو کامپوزیت $Al\text{-}SiO_2$؛ امواج مافوق صوت؛ SEM؛ ریزساختار؛ استحکام فشاری.

Investigation of compressive properties and microstructure of $Al\text{-}SiO_2$ nanocomposites produced by ultrasonic and stir casting techniques

A. Salehi A.Babakhani S.M. Zebarjad

Abstract

In this study, it is tried to use an inexpensive and new method for fabrication of aluminum matrix nanocomposites reinforced with SiO_2 nano-sized ceramic particles. In this method, ultrasonic device was used for increasing wettability and dispersion of reinforcement nanoparticles within the aluminum melt. After producing aluminum nanocomosites reinforced with 0.25, 0.5, 0.75 and 1.0 wt. % SiO_2, microstructure study of matrix were carried out with an optical microscope and SEM equipped with energy dispersive spectroscopy (EDS). At the end, compression test were taken on produced nanocomposites. The results show that adding SiO_2 nanoparticles will improve structure and properties of the final product by creating nucleation center for intermetallic compounds and also increase compressive strength of produced nanocomposites than the pure Al alloy.

Key Words $Al\text{-}SiO_2$ nanocomposite; ultrasonic; SEM; microstructure; compressive strength.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/۱۰/۱۷ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۱۰/۱٤ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) عضو گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد و کارشناس ارشد مهندسی مواد دانشگاه فردوسی.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار گروه مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) استاد گروه مهندسی مواد دانشگاه شیراز.

مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی به‌طور گسترده‌ای در سال‌های گذشته مطالعه شده‌اند و برای کاربردهایی همچون هوافضا و صنایع نظامی از آن‌ها بهره گرفته شده است [1-3]. با به کارگیری کامپوزیت‌های زمینه فلزی، خواص مکانیکی جالبی مانند مدول ویژه بالا، استحکام بالا، مقاومت خزشی دمای بالا و چگالی پایین را می‌توان بدست آورد [4].

معمولاً برای افزایش استحکام تسلیم و نهایی فلز از میکروذرات سرامیکی به عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده می‌شود اما استفاده از این ذرات میکرونی، انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های زمینه فلزی را کاهش می‌دهد. از این رو در سال‌های اخیر تلاش شده است که از نانوذرات سرامیکی برای استحکام‌بخشی زمینه‌های فلزی استفاده شود [5]. در این راستا پِنگ [6] اشاره کرده است که با افزودن نانوذرات تقویت‌کننده به آلیاژهای آلومینیومی، مقاومت خزشی دمای بالا و عمر خستگی بهبود خواهد یافت.

به تازگی چندین روش مانند آلیاژسازی مکانیکی، نانوزینترینگ، آبکاری الکتریکی، ریخته‌گری، و رسوب لیزر، برای ساخت نانوکاموزیت‌های زمینه فلزی استفاده شده است که به خاطر صرف وقت و انرژی بالا، بسیار پر هزینه هستند [7]. در این میان، ریخته‌گری به عنوان یک روش ساخت در حالت مذاب، توانایی ساخت محصولات با شکل‌های پیچیده را دارد، بنابراین تولید یک نانو کامپوزیت با پراکندگی یکنواخت نانوذرات تقویت‌کننده به روش ریخته‌گری، بسیار مقرون به صرفه خواهد بود [8,9]. در روش‌های ریخته‌گری، پراکنده کردن یکنواخت نانوذرات در مذاب، به خاطر ویسکوزیته بالای مذاب، ترشوندگی ضعیف نانوذرات با زمینه فلزی و نسبت سطح به حجم بالای آن‌ها، بسیار سخت است و این مسائل منجر به آگلومراسیون و خوشه‌ای شدن نانوذرات در مذاب می‌شود [10].

ترشوندگی فاز سرامیکی جامد و زمینه فلزی مذاب، شرط ضروری برای ایجاد یک پیوند رضایت‌بخش، حین ریخته گری می‌باشد [11]. خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به‌طور گسترده‌ای توسط ساختار و خواص فصل مشترک تقویت‌کننده–فلز کنترل می‌شود. مطالعات نشان داده است که یک فصل مشترک قوی، اجازه توزیع و انتقال نیرو از زمینه به تقویت‌کننده را می‌دهد که نتیجه آن افزایش استحکام و مدول الاستیک است، اما همان‌طور که اندازه ذرات تقویت‌کننده کاهش می‌یابد، بدست آوردن شرایط ترشوندگی مناسب، بسیار مشکل خواهد شد [12].

برای غلبه بر کشش سطحی، می‌توان از یک نیروی مکانیکی استفاده کرد و ترشوندگی را بهبود بخشید. اما در چندین کار تحقیقاتی دریافت شده است که هم زدن مکانیکی به‌تنهایی نمی‌تواند مشکل ترشوندگی ضعیف را، زمانیکه آلیاژ زمینه در یک حالت کاملاً مذاب قرار دارد، حل کند. از این رو برای بهبود ترشوندگی ذرات تقویت‌کننده با مذاب، امواج آلتراسونیک اعمال شدند و چنین دریافت شد که امواج آلتراسونیک، زاویه تماس سیستم را از حالت بدون تر شوندگی به ترشوندگی، تغییر می‌دهد [13,14].

فرایند ترکیب کردن نانوذرات با استفاده از امواج مافوق صوت که بر مبنای روش ذوبی بوده و اخیراً معرفی شده است، روشی مناسب برای پخش یکنواخت نانوذرات و تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌باشد. امواج مافوق صوت به صورت موج سینوسی از میان یک مذاب عبور کرده و سیکل انبساط ایجاد شده در اثر آن، یک فشار منفی را روی مذاب ایجاد می‌کند که مولکول‌ها را به دور از یکدیگر می‌کشد. اگر موج ایجاد شده به اندازه کافی شدید باشد، سیکل انبساط ایجاد شده می‌تواند حفراتی را در مذاب ایجاد کند که به این فرایند، حفره‌زایی گفته می‌شود. به خاطر نوع سینوسی موج صوتی، حباب‌های گازی کوچک ایجاد شده، حالت‌های متناوب انبساط و انقباض را تجربه می‌کنند. اگر اندازه حباب، توان موج ایجاد شده و یا فرکانس، بیشتر از یک آستانه خاص بشوند، فرایند حفره زایی گذرا، ایجاد می‌شود [15-17].

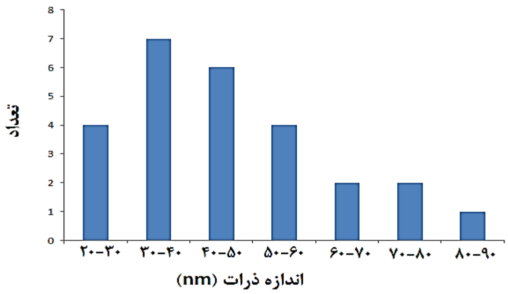
در این فرایند، حباب‌ها مدت زیادی پایدار نیستند و فشار ایجاد شده در مراحل بعدی باعث در خود فروپاشی حباب‌ها می‌شود. این اتفاق، می‌تواند یک محیط غیرمعمولی را برای واکنش‌های شیمیایی ایجاد کند. لحظه انفجار را نقطه داغ می‌نامند که می‌تواند به‌طور مقطعی دمایی تا حدود ۵۰۰۰°C و فشار ۱۰۰۰atm و نرخ گرم کردن و سرد کردن بیشتر از K/s $۱۰^{۱۰}$ را ایجاد کند که به‌طور مؤثری نانوذرات را در فلزات آلیاژی پراکنده کرده و ترشوندگی آن‌ها را افزایش می‌دهد. از امواج مافوق صوت حتی می‌توان به عنوان یک عامل حذف کننده حفرات گازی در ریخته‌گری فلزات استفاده کرد [18,19].

تاکنون تحقیق جامعی در جهت تولید نانو-کامپوزیت $Al\text{-}SiO_2$ با کمک امواج مافوق صوت و ریخته گری گردابی و همچنین بررسی‌های ریزساختاری آن‌ها صورت نگرفته است. از این رو هدف از انجام تحقیق حاضر، تولید نانو کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با درصدهای وزنی مختلف نانوذرات سیلیکا به روش ریخته‌گری و مطالعه ریزساختار و خواص فشاری آن‌ها می‌باشد.

روش آزمایش

آلیاژ آلومینیوم (BS1490) LM2، محصول شرکت تولیدی و صنعتی آلیاژسازان نقش جهان، با ترکیب نشان داده شده در جدول (۱) به عنوان ماده زمینه انتخاب شد که قابلیت ذوب مناسب، به خاطر درصد بالای سیلیسیم، از ویژگی‌های آن می‌باشد.

برای انتخاب یک تقویت‌کننده مناسب برای نانو کامپوزیت آلومینیومی، فاکتورهای مهمی مانند چگالی، ترشوندگی و واکنش‌پذیری شیمیایی در دماهای بالا بایستی در نظر گرفته شود [20]. بر این اساس از نانوذرات اکسیدسیلیسیم، محصول شرکت US Research آمریکا با خلوص بیشتر از ۹۸٪، به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. پراکندگی نانوذرات و محاسبه اندازه آن ها با معلق سازی در محلول $50\%NH_3\text{-}50\%H_2O$ و با استفاده از دستگاه اندازه-گیری ذرات CORDOUAN مدل VASCO 3 ساخت کشور فرانسه، با استفاده از نور لیزر با طول موج nm ٦٥۷ انجام گرفت (شکل ۱).



شکل ۱ منحنی اندازه نانوذرات اکسید سیلیسیم.

نمونه‌های نانوکامپوزیتی با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم تولید شدند. برای این منظور، ابتدا شمش آلیاژی در کوره‌ای با دمای ٦۸۰±۱۰°C ذوب شد و برای افزایش ترشوندگی نانوذرات سرامیکی، ۳/۵ درصد وزنی آلیاژ 50wt%Al-50wt%Mg به مذاب اضافه شد. سپس با توجه به درصد وزنی لازم برای هر نمونه، نانوذرات SiO_2 به مذاب اضافه شدند و مذاب با سرعت ۷۰۰ دور بر دقیقه و با استفاده از تکنیک ریخته‌گری گردابی، هم زده شد. بررسی سطح مذاب در این مرحله نشان می‌داد که مقداری از نانوذرات بدون اینکه وارد مذاب شوند روی سطح انباشته شده‌اند. از این رو پس از اینکه مذاب به مدت کافی (۳±۱۵ دقیقه) به کمک همزن مکانیکی هم زده شد، پروب دستگاه آلتراسونیک مدل BANRY شکل (۲) وارد مذاب شده و با فرکانس ۲۰kHz به مدت ۱۵-۱۰ دقیقه مذاب را متلاطم کرد تا فرایند ترشوندگی و پخش نانو ذرات در مذاب آلیاژی را بیش از پیش بهبود ببخشد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ زمینه.

عنصر	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Pb	Al
درصد وزنی	۸/٦۲	۱/۱٦	۰/۸۳	۰/۱٤	۰/۲۳	۱/٤٦	۰/۱۵	باقیمانده

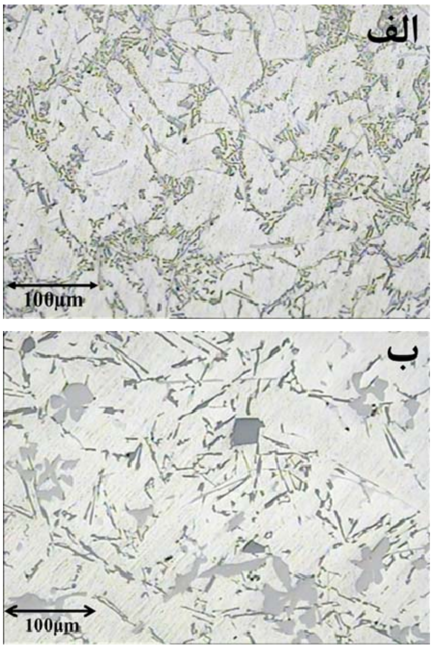


شکل ۲ دستگاه آلتراسونیک استفاده شده برای پخش نانوذرات در مذاب.

پس از این مرحله مذاب از بوته خارج و در هوای آزاد سرد شد. به منظور مشاهده ریز ساختار و توزیع نانوذرات اکسید سیلیسیم در نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاصل، بررسی‌های میکروسکوپی توسط میکروسکوپ نوری Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO 1450VP (35kV) انجام گرفت. برای مشاهده ساختار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، نمونه‌ها مانت شده و پس از سنباده‌زنی و پولیش، توسط لایه‌ای از طلا پوشش داده شدند. سپس برای انجام آزمون فشار، دستگاه ZWICK (Z250) و با سرعت حرکت فک ۳/۱ mm/min مورد استفاده قرار گرفت و هر آزمون دو بار در دمای اتاق تکرار شد.

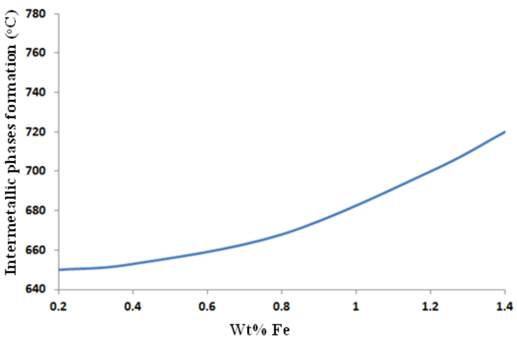
نتایج و بحث

بررسی‌های ریزساختاری. به منظور انجام بررسی‌های ریزساختاری، نمونه‌ای از آلیاژ آلومینیوم غیرکامپوزیتی (پس از ذوب شدن و قبل از انجام فرایند کامپوزیت‌سازی) و همچنین نمونه‌ای از نانو کامپوزیت‌های تولید شده با استفاده از امواج مافوق صوت، توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند (شکل۳). همان‌طور که از مقایسه تصاویر بدست آمده در شکل (۳) دیده می‌شود، ریزساختار آلیاژ پس از انجام فرایند کامپوزیت سازی، به‌طور کامل تغییر کرده است.



شکل ۳ بررسی‌های میکروسکوپی نوری از ریزساختار الف) آلیاژ آلومینیوم اولیه، پس از ذوب شدن و قبل از کامپوزیت سازی، ب) نانو کامپوزیت $Al\text{-}0.5wt\%SiO_2$.

لیوبو و جی [21] نشان دادند که آلیاژهای آلومینیمی که در ساختارشان آهن وجود دارد، چنانچه در دمایی نزدیک به دمای تشکیل ترکیبات بین‌فلزی حاوی آهن، مجدداً ذوب شوند، آهن موجود در زمینه می‌تواند با آلومینیم و سیلیسیم، ترکیبات بین فلزی مختلفی تشکیل دهد. همچنین شبستری [۲۲] نشان داد که هرچه مقدار آهن موجود در زمینه آلیاژ آلومینیم بیشتر باشد دمای تشکیل ترکیبات بین فلزی، بیشتر می‌شود (شکل ٤).



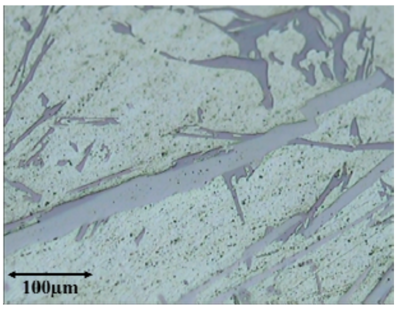
شکل ٤ افزایش دمای تشکیل ترکیبات بین فلزی در آلیاژهای آلومینیم، با افزایش درصد وزنی آهن [۲۲].

با توجه به شکل (٤) و با در نظر گرفتن اینکه آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق، حداقل ١/١٦٪ وزنی آهن در زمینه خود دارد، دمای تشکیل ترکیبات بین فلزی در این آلیاژ بالاتر از ٦٨٠°C خواهد بود. به منظور بررسی ترکیبات بین‌فلزی ایجاد شده، ساختار آلیاژ در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت:

آلیاژ در دمای ٦٨٠±١٠°C ذوب شد و سپس به مدت ۲۰ دقیقه توسط همزنی که برای فرایند کامپوزیت‌سازی طراحی شده بود، هم زده شد.

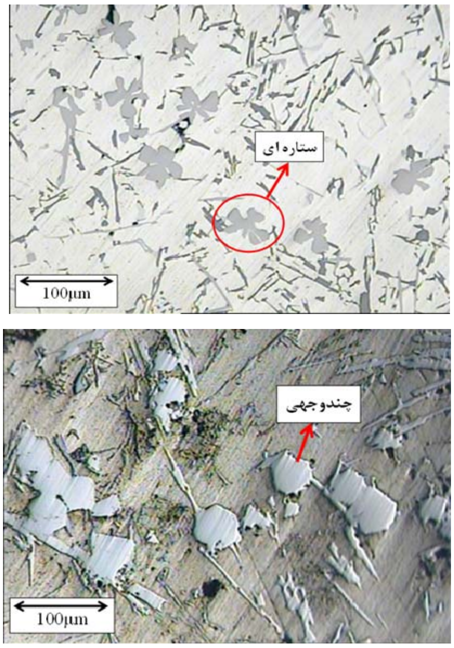
آلیاژ در دمای ٦٨٠±١٠°C ذوب شد و سپس ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم به آن اضافه شد و به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد.

زمانی که آلیاژ تحت فرایند I قرار گرفت، ساختارهای بین فلزی به صورت تیغه‌های بسیار بزرگ و خشن دیده شدند (شکل ۵). علت این امر به این نکته برمی‌گردد که فرایند تشکیل ترکیبات بین فلزی در آلیاژهای آلومینیم-سیلیسیم بوسیله مکانیزم های جوانه-زنی و رشد کنترل می‌شود. در این آزمایش، فرایند رشد، فرایند غالب بوده و باعث شده است با گذشت زمان، اندازه تیغه‌ها بزرگ‌تر شود. این ترکیبات بین فلزی ناشی از حضور آهن که ساختارهای تیغه‌ای شکل درشت و خشن دارند، باعث افت خواص مکانیکی آلیاژ شده و به عنوان یک ساختار مضر در آلیاژهای آلومینیمی مطرح می‌شوند [۲۳و ۲٤].



شکل ۵ ترکیبات بین فلزی تیغه‌ای شکل در آلیاژ آلومینیم.

نتیجه بررسی میکروساختار بدست آمده از آزمایش II که محصول آن کامپوزیت آلومینیم + ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات اکسید سیلیسیم است، در شکل (٦) نشان داده شده است.



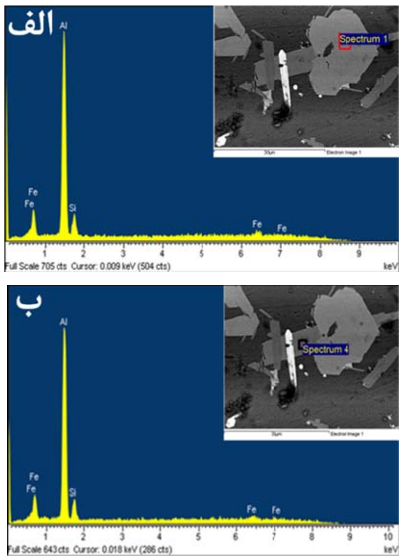
شکل ٦ اشکال مختلف ترکیبات بین فلزی ناشی از حضور آهن در نانو کامپوزیت تولید شده با ۰/۵٪ وزنی نانوسیلیس.

کیکو [25] و همکارانش برای بررسی نقش نانوذرات در اصلاح ساختار آلیاژهای آلومینیومی، نانوذرات SiC، Al_2O_3 و TiC را با استفاده از امواج مافوق صوت به مذاب آلیاژ آلومینیوم A356 اضافه کردند. آنها نشان دادند که این نانوذرات باعث کاهش مادون انجماد در آلیاژ مربوطه شده و این قابلیت را دارند که به عنوان مراکز جوانه‌زنی جهت اصلاح ساختار آلیاژ آلومینیوم عمل کنند. از این‌رو پیش‌بینی می‌شود نانوذرات اکسید سیلیسیم استفاده شده در این تحقیق، مانند مراکز جوانه‌زنی در زمینه آلیاژ آلومینیم عمل کرده و فازهای تشکیل شده را اصلاح کرده‌اند.

در حین انجماد آلیاژهای آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات اکسیدی، به خاطر نفوذ گرمایی و هدایت حرارتی پایین‌تر نانوذرات در مقایسه با زمینه، جوانه-زنی فاز آلومینیوم در فاصله دورتری از نانوذرات (جایی که دما کمتر است) آغاز می‌شود. این عمل منجر به غنی شدن مذاب اطراف نانوذرات تقویت کننده، از سیلیسیوم و سایر عناصر موجود در مذاب، خواهد شد.

بنابراین سطوح نانوذرات تقویت کننده می‌توانند به عنوان زیرلایه‌های مناسبی برای جوانه‌زنی فازهای موجود در زمینه، عمل کنند. فرایند اصلاح ساختارهای بین‌فلزی با تغییر دادن تیغه‌های درشت اولیه به اشکال مختلف ستاره‌ای، سوزنی و چندوجهی (پلی هدرال) انجام می‌شود. این اشکال بوجود آمده از ترکیبات بین فلزی حاوی آهن، نه تنها خواص مکانیکی آلیاژ را کاهش نمی‌دهند بلکه به عنوان یک فاز سخت و با پایداری حرارتی بالا عمل کرده و از افت استحکام و سختی آلیاژ در دمای بالا جلوگیری می‌کنند [٢٦].

در شکل (٧) نتیجه آنالیز EDS دو ساختار مختلف از ترکیبات بین‌فلزی ناشی از حضور آهن در نانوکامپوزیت آلومینیومی تولید شده، نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با اینکه یکی از آن‌ها ساختار سوزنی و دیگری ساختار چندوجهی دارد، هر دو ترکیب یکسانی را نشان می‌دهند.



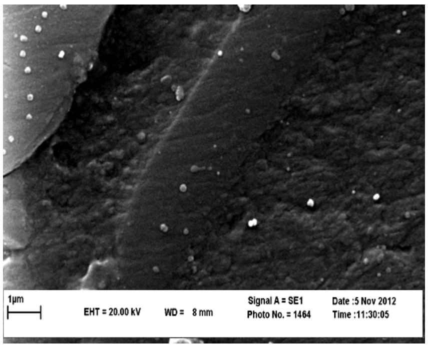
شکل ٧ آنالیز EDS از یک ترکیب بین فلزی ولی با دو شکل مختلف، الف) چندوجهی و ب) سوزنی.

درصد وزنی عناصر بدست آمده از آنالیز EDS شکل (٧-الف)، در جدول(٢) آورده شده است. باب بررسی مقادیر نشان داده شده در جدول (٢)، پیش‌بینی می‌شود فازهای بین‌فلزی موجود در نمونه‌های نانوکامپوزیتی ساخته شده که اغلب ساختار چندوجهی دارند، نشان دهنده ترکیب $Al_{12}Fe_3Si_2$ می‌باشند.

جدول ٢ ترکیب شیمیایی فاز $Al_{12}Fe_3Si_2$.

عنصر	Al	Fe	Si
درصد وزنی	٥١	٣٤	١٤

پس از انجام بررسی‌های میکروسکوپی نوری، برای بررسی حضور و همچنین نحوه پراکندگی نانوذرات اکسید سیلیسیم، نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ٨).

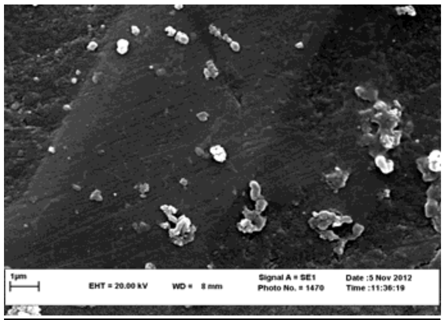


شکل ٨ پراکندگی نانو ذرات اکسید سیلیسیم در زمینه نانو کامپوزیت Al-0.5wt%SiO_2 تولید شده.

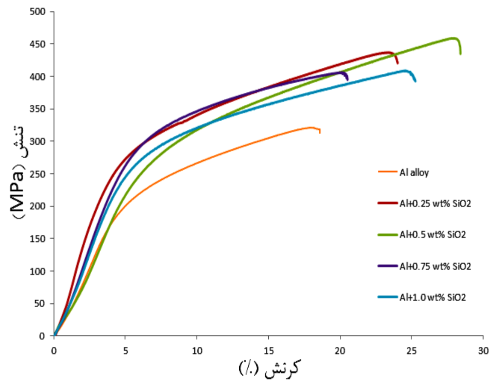
همان‌طور که دیده می‌شود، نانوذرات به خوبی در زمینه پراکنده شده‌اند. اگرچه تعدادی نانوذرات خوشه‌ای شده در زمینه دیده می‌شود که با افزایش درصد وزنی فاز تقویت‌کننده، همان‌طور که در شکل (٩) نشان داده شده است، مقدار آن‌ها بیشتر می‌شود. عقیده بر این است که فرایند حفره‌زایی گذرای ایجاد شده در اثر امواج مافوق صوت، باعث فروپاشی شدید میکروحفرات گازی اطراف خوشه‌های نانوذرات می‌شود، خوشه‌ها را می‌شکند و نانوذرات را در زمینه پراکنده می‌کند. بعلاوه، حفره‌زایی گذرا، لایه گازی را از سطح نانوذرات خارج کرده و ترشوندگی بین نانوذرات و زمینه را به‌طور مؤثری بهبود می‌بخشد [27].

بررسی خواص فشاری. شکل (١٠) منحنی‌های تنش-کرنش فشاری آلومینیوم غیرکامپوزیتی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده با درصدهای وزنی مختلف از نانوذرات سیلیکا و جدول (٣) ، نتایج

حاصل از بررسی رفتار کارسختی نمونه‌های تولید شده را نشان می‌دهد.



شکل ۹ خوشه‌ای شدن نانوذرات SiO_2 در زمینه نانو کامپوزیت $Al\text{-}1.0wt\%SiO_2$ تولید شده.



شکل ۱۰ منحنی‌های فشاری آلیاژ آلومینیوم غیر کامپوزیتی و نانو کامپوزیت‌های $Al\text{-}SiO_2$.

همان‌طور که دیده می‌شود تمام نمونه‌های نانوکامپوزیتی، استحکامی به مراتب بیشتر از آلیاژ آلومینیوم اولیه دارند. این افزایش استحکام، ناشی از عواملی مانند حضور نانوذرات سرامیکی در زمینه، تولید نابجایی در اثر عدم انطباق مدول الاستیک و ثابت انبساط حرارتی زمینه و فاز تقویت‌کننده، انتقال نیرو از زمینه به فاز تقویت‌کننده و همچنین مکانیزم استحکام‌بخشی اوروان می‌باشد [2]. اما مقدار افزایش استحکام در نمونه‌های مختلف متفاوت است، به‌طوریکه با افزایش نانوذرات سیلیکا تا ۰/۵ درصد وزنی، استحکام به‌طور صعودی افزایش می‌یابد اما در مقادیر فاز تقویت‌کننده بیشتر (۰/۷۵ و ۱/۰ درصد وزنی)، استحکام نمونه‌ها کمتر شده است.

بر اساس رابطه هولومان ($\sigma = k\varepsilon^n$)، با کاهش توان کارسختی، نرخ کارسختی افزایش می‌یابد. طبق نتایج نشان داده شده در جدول (۳) می‌توان دید که کارسختی نمونه‌های تولید شده، با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده تا ۰/۵٪ وزنی افزایش و سپس کاهش یافته‌اند. به نظر می رسد تغییرات مشاهده شده در رفتار کارسختی و استحکام فشاری نمونه‌های تولید شده، ناشی از خوشه‌ای شدن نانوذرات و افزایش تخلخل در اثر کاهش قدرت دستگاه امواج مافوق صوت (به خاطر افزایش ویسکوزیته مذاب در درصدهای وزنی بالای فاز تقویت‌کننده) می‌باشد. در مقادیر بیشترِ فاز تقویت‌کننده، فرایند آگلومره شدن، مقدار نانوذرات مؤثر در زمینه را کاهش می‌دهد و از آنجایی که، مکانیزم استحکام‌بخشی اوروان یکی از مهمترین مکانیزم ها در افزایش استحکام نانوکامپوزیت ها می‌باشد، استحکام نهایی نمونه کاهش خواهد یافت [7]. مظاهری [3] نیز در کار تحقیقاتی خود نشان داد که با افزایش مقدار فاز تقویت‌کننده، میکرو حفرات موجود در محصولات نانوکامپوزیتی افزایش می‌یابد که می‌تواند کاهش خواص فشاری محصول نهایی را در پی داشته باشد.

جدول ۳ نتایج حاصل از برسی رفتار فشاری و کارسختی نمونه‌های تولید شده.

نمونه	فاز تقویت کننده (wt%)	استحکام فشاری (MPa)	توان کار سختی (n)
۱	۰	۳۲۱	۰/۳۳۹۲
۲	۰/۲۵	٤۳۷	۰/۲۹٤٤
۳	۰/۵	٤۵۳	۰/۲٤٦۲
٤	۰/۷۵	٤۰۵	۰/۲۵٦۸
۵	۱/۰	٤۰۳	۰/۲٦۹۱

نتیجه‌گیری

۱. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که استفاده از روش هم زدن مکانیکی و اعمال امواج مافوق صوت، پراکندگی یکنواخت فاز تقویت‌کننده در زمینه را به دنبال خواهد داشت و با ایجاد ترکیبات بین فلزی ستاره‌ای شکل، سوزنی و چندوجهی، سبب اصلاح ساختارهای بین فلزی می‌شود.

۲. بررسی خواص فشاری، نشان داد که استحکام فشاری و نرخ کار سختی تمام نمونه‌های نانوکامپوزیتی از آلیاژ آلومینیوم اولیه بیشتر است و افزودن نانوذرات سیلیکا تا ۰/۵ درصد وزنی باعث افزایش استحکام محصول نهایی تا ۴۱٪ خواهد شد.

۳. در مقادیر بیشتر از ۰/۵٪ وزنی نانوذرات SiO_2، در اثر کلوخه‌ای شدن نانوذرات در زمینه و افزایش تخلخل به خاطر کاهش قدرت دستگاه آلتراسونیک که ناشی از افزایش ویسکوزیته مذاب می‌باشد، استحکام کاهش می‌یابد، به‌طوریکه استحکام نمونه تقویت شده با ۱/۰٪ وزنی نانوذرات SiO_2 نسبت به نمونه تقویت شده با ۰/۵٪ وزنی نانوذرات SiO_2، ۱۱٪ کاهش را نشان داد.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای مهندس محمدصادق ابروی، عضو گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد، به خاطر راهنمایی‌هایشان در جهت پیشبرد این طرح، تقدیر و تشکر می‌گردد.

مراجع

1. Park, J., Lee, S., Lee, M., Rhee, C., "Dispersion of ultrafine SiC particles in molten Al-12Si alloy", *Trans. Nonferrous Met.* Soc.China, Vol. 21, pp. s33-s36, (2011).
2. Prater, T., "Friction Stir Welding of Metal Matrix Composites for use in aerospace structures", *Acta Astronautica*, Vol. 93, pp. 366-373, (2014).
3. El-Kady, O., Fathy, A., "Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites", *Materials & Design*, Vol. 54, pp. 348-353, (2014).
4. Karimzadeh, F., Rastar, V., Enayati, M.H., "Thermal Stability and Mechanical Properties of Al-Al_2O_3 Nanocomposite Produced by Mechanical Milling and Hot-Pressing", Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties, Vol. 1, (2012).
5. Li, X., Yang, Y., Cheng, X., "Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites", *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp. 3211 – 3212, (2004).
6. Peng, L.M., Zhu, S.J., "Creep of metal matrix composites reinforced by combining nano-sized dispersoids with micro-sized ceramic particulates or whiskers (review)", Vol. 18, pp. 215-254, (2003).
7. Yu, H., "Processing Routes for Aluminum based Nano-Composites", Worcester, M. Sc. Thesis, (2010).
8. Saberi, Y., Zebarjad, S.M., Akbari, G.H., "On the role of nano-size SiC on lattice strain and grain size of Al/SiC nanocomposite", *Journal of alloys and compounds*, Vol. 484, pp. 637-640, (2009).
9. Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., "Metal matrix composites: production by the stir casting method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, pp. 1-7, (1999).
10. Yang, Y., Lan, J., Li, X., "Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic

dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 380, pp. 378–383, (2004).

11. OH, S.Y., Cornie, J.A. and Russell, K. C., "Wetting of Ceramic Particulates with Liquid Aluminum Alloys: Part II. Study of Wettability", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 20A, pp. 533-541, (1989).
12. Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., "The wettability of SiC particles by molten aluminium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, pp. 324-328, 2001.
13. Zhou, W. and Xu, Z. M., "Casting of SiC Reinforced Metal Matrix Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, pp. 358-363, (1997).
14. Donthamsetty, S. and Rao. D, N., "Investigation on mechanical properties of A356 nanocomposites fabricated by ultrasonic assisted cavitation", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 41, pp. 121-129, (2010).
15. Sanchez, M.C.T., "Generation of heterogeneous cellular structures by sonication", United Kingdom, ph. D. Thesis, (2008).
16. Borgonovo, C., "Aluminum Nano-composites for Elevated Temperature Applications", Worcester, M. Sc. Thesis, (2010).
17. Wang, J., He, Z.S., Wu, J.H., Wan, Z.P., "Effect of Ultrasonic Wave on Melt Foaming Process of Aluminum Foam", *Advanced Materials Research*, Vol. 97-101, pp. 227-230, (2010).
18. Suslick, K. S., Didenko, Y., Fang, M., "Acoustic cavitation and its chemical consequences", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol. 357, pp. 335-353, (1999).
19. Suslick, K. S., "The chemical and physical effects of ultrasound", *Scientific American*, pp. 80-86, (1989).
20. Bo, L., Xiaoguang, Y. and Hongjium, H.,"Microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Fe alloys prepared by semi-solid formation", *china foundry journal*, Vol. 8, pp. 424-431, (2011).
21. Ji, S., Yang, W., Gao, F., Watson, D., Fan, Z., "Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al–Mg–Si–Mn and Al–Mg–Si diecast alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 564, pp. 130-139, (2013).

۲۲. سعید شبستری، "سینتیک تشکیل ترکیبات بین فلزی در آلیاژهای آلومینیوم"، نشریه مهندسی متالورژی، شماره ۱۱، ۱۵-۲۲،(۱۳۸۰).

۲۳. علیرضا دمان، علی شفیعی، مسعود امامی قمی، سعید شبستری، "بررسی نقش بهسازی ریز ساختار و خواص آلیاژ A413"، مجله مهندسی مکانیک، شماره ٤٤، ٤٠-٤٨، (١٣٨٤).

۲٤. حسین یدالله تبار، سعید شبستری، حسن ثقفیان و محمود شهبازی، "بررسی تاثیر ارتعاش، جوانه زایی و بهسازی بر ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A380"، نشریه دانشکده فنی، شماره ۸، ۱۰۸۱-۱۰۹۳، (١٣٨٦).

25. Cicco, Michael P. De., Turng, Lih-Sheng., Li, Xiaochu., Perepezko, John H., "Nucleation Catalysis in Aluminum Alloy A356 Using Nanoscale Inoculants", *Metallurgical and materials transactions A*, Vol. 42A, pp. 2323-2330, (2011).

۲۶. احسان پرشید فرد، محسن قنبری حقیقی و سعید شبستری، "بررسی ریز ساختار حاصل ازشکل-دهی نیمه جامد آلیاژ Al-Si9-Fe4-Mn2 تهیه شده به روش تبلور مجدد و ذوب جزیی ساختار تغییر فرم یافته"، ریخته گری، شماره ۹٤، ۱۳۸۸، ۳۱–۳۸.

27. Li, X., Yang, Y., Weiss, D., "Ultrasonic Cavitation Based Dispersion of Nanoparticles in Aluminum Melts for Solidification Processing of Bulk Aluminum Matrix Nanocomposite: Theoretical Study, Fabrication and Characterization", Transactions American Foundrymens SOCIETY, pp. 249-260, (2007).

28. Sajjadi, S.A., Ezatpour, H.R., Beygi, H., "Microstructure and mechanical properties of Al–Al2O3 micro and nanocomposites fabricated by stir casting", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 8765-8771, (2011).

29. Tsunekawa, Y., Suzuki, H., Genma, Y., "Application of ultrasonic vibration to in situ MMC process by electromagnetic melt stirring", *Materials & Design*, Vol. 22, pp. 467-472, (2001).

30. Mazaheri, A., Ostadshabani, M., "Investigation on mechanical properties of nano-Al_2O_3-reinforced aluminum matrix composites", *composite materials*, Vol. 45, pp. 2579-2586, (2011).